



Toiles collectives de chenilles du Petit Hyponomeute du fusain, *Yponomeuta plumbellus* (Lép. Yponomeutidé), sur des fusains constituant d'une haie champêtre - Cliché A. Fraval

Par Alain Fraval

Les insectes fileurs de soie - 1^{ère} partie

Cocon douillet et résistant mais aussi tente ou vélum, ancre, filet, accessoire sexuel, parachute, ligne de vie, clapet, radeau, harnais, aérophore, cuvelage de galeries, nid-radiateur, ligne de pêche, corde d'escalade, réseau de tunnels, fil à coudre, pied à œuf... les insectes séricigènes fabriquent ces objets en soie. Un extraordinaire « biomatériau » dont on passera en revue les producteurs et les usages.

des (et d'Arachnides) et facilitées par le perfectionnement des outils d'analyse physico-chimique.

Le mot soie¹ désigne toute fibre à base de protéines sécrétée par des Arthropodes. Ceux-ci la filent, c'est-à-dire transforment en filament insoluble – par polymérisation – la solution aqueuse, produite et stockée dans la glande séricigène. La soie a des compositions en acides aminés, des structures, des qualités et des usages variés. Le Ver à soie, chenille du Bombyx du mûrier *Bombyx mori* (Lép. Bombycidé), produit un fil textile de haute qualité ; on l'a domestiqué

et on l'exploite pour la matière première des étoffes de soie depuis près de quatre millénaires. Il a fourni, jusqu'à récemment, l'essentiel des connaissances sur la soie, depuis sa production par les glandes labiales de la chenille prête à se nymphoser jusqu'aux propriétés technologiques du fil, en passant par sa structure physico-chimique. L'espoir de pouvoir encore mieux tirer parti de ce matériau extraordinaire a motivé de nouvelles études, portant sur la soie produite par d'autres Hexapo-



Adulte et cocons éclos du Bombyx du mûrier sur un rameau nourricier - Cliché H. Guyot

1. Soie vient du latin *saeta*, poil rude de certains animaux. Ce sens est conservé, notamment pour désigner les « poils » des insectes. Soie est également la partie métallique effilée d'une arme blanche ou d'un outil qui est insérée dans la poignée ou le manche. Le formant séri(c)- (séricigène, sériciculture, sérigraphie...) vient du grec *-seres* désignait les pays orientaux d'où parvenait la soie fine (*serikos*) – via le latin *sericus* (en soie).



En haut : élevage de vers à soie sur clayette.
En bas : cocons frais de ver à soie sur séri-graphie - Clichés H. Guyot

La production de soie est l'apanage de trois classes d'Arthropodes : les Arachnides, les Myriapodes et les Hexapodes. En guise de filières, ces derniers disposent au plus d'épaississements de la cuticule et ne peuvent donc, contrairement aux Arachnides, faire varier ni la composition du fil, ni son diamètre, ni sa vitesse de filage.

La soie du Ver à soie est de loin la mieux caractérisée. La chenille de 5^e stade produit un fil unique de 2 μm de section, long de 1 à 1,5 km, pour confectionner le cocon de nymphose, qui pèse de 300 à 500 μg . Le fil, formé de deux brins (issus chacun d'une des deux glandes labiales), est constitué aux deux tiers de fibroïne, entourée de séricine. La fibroïne, une molécule géante de 400 kDa (la masse moléculaire d'une protéine est de quelque 110 daltons), est synthétisée dans la partie postérieure de la glande séricigène sous forme de granu-

les stockés au centre de l'organe où ils sont englobés par la séricine, qui est sécrétée à ce niveau. Les cellules sécrétrices sont de taille exceptionnelle (0,3 mm de diamètre), avec des noyaux branchus résultant d'une amplification de l'ADN de l'ordre de 200 000 fois. La partie antérieure de la glande est en forme de tube rétréci d'où le fil sort à grande vitesse : 0,4 à 1,5 cm/s. La chenille dépose une goutte sur un support puis « tire » en faisant des mouvements en forme de 8 avec la tête. Le tissage du cocon correspond à une « dépense » de 20% de la masse de la chenille.

La soie doit ses propriétés à des arrangements très particuliers d'acides aminés (non essentiels) : glycine et/ou sérine. La fibroïne est un matériau semi-cristallin, avec des régions à structure moléculaire ordonnée dans une matrice amorphe. Il en existe 5 types dont trois principaux : en superhélice α , en feuillets parallèles β avec les chaînes parallèles à l'axe de la fibre (cas de la soie de *B. mori* et de la plupart des Lépidoptères), en feuillets plissés β , avec les chaînes perpendiculaires à l'axe ; tous ont en commun de former de longues chaînes liées par des ponts hydrogène, qui confèrent à la fibre solidité et stabilité. On qualifie également de soie des biopolymères, dont la structure est analogue à celle du collagène des Vertébrés ou à celle de la chitine, et dont sont faits notamment les cocons des tenthrèdes.

La fibroïne est en général associée à une protéine amorphe, la séricine, qui en cimente les brins ; chez les Lépidoptères, la séricine est élimi-



Cocon et adulte de *Diprion similis* (Hym. Diprionidé) - Cliché P. Velay-OPIE

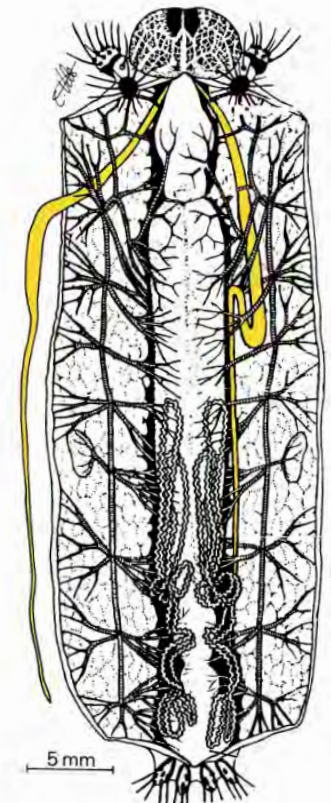
née grâce à un enzyme appelé co-conase par le papillon qui émerge et peut ainsi dissocier les fils du cocon.

La description plus précise de la structure des différents types de soie connus sort du cadre de cet article, d'autant qu'il y a très peu de corrélation entre structure, type de glande séricigène et fonction des différentes soies produites par les insectes².

■ LES GLANDES SÉRICIGÈNES DES INSECTES

Trois catégories de glandes sécrètent de la soie : les glandes labiales (comme chez le Ver à soie), les tubes de Malpighi et les glandes cuticulaires rapprochées des glandes collétériques.

Les **glandes labiales**, paires, sécrètent communément la salive ; elles débouchent à la base du labium et de l'hypopharynx. Elles ont d'autres



Anatomie de la chenille de *Lymantria dispar* avec, en jaune, les glandes séricigènes
Dessin Claire Villemant

2. Une synthèse très récente : Sutherland T.D. et al., 2010. Insect Silk: One Name , Many Materials. *Annual Review of Entomology*, 55, 171-188.

fonctions : produire l'aliment trophallactique (dont la gelée royale chez l'abeille), du venin (chez les Diptères Asilidés) ou... de la soie. Dans ce cas, on les appelle glandes séricigènes. On les trouve chez des groupes taxinomiquement disparates : Orthoptères, Psocoptères, Hyménoptères, Aphaniptères, Diptères et Lépidoptères.

Chez la chenille, par exemple, ces glandes sont deux longs tubes qui s'étendent dans tout le corps ; la soie est filée à travers un orifice unique (filière).

Les **tubes de Malpighi** sont les organes de l'osmorégulation et de l'excrétion des insectes, qui produisent l'urine ; ils débouchent dans le tube digestif à la jonction du mésentéron (intestin moyen) et du proctodéum. Chez divers insectes, ils ont une fonction sécrétoire : « crachats de coucou » des Cercopidés, par exemple. Chez le ver luisant du plafond des grottes néo-zélandaises, *Arachnocampa* (Dip. Kéroplatidé), ils sont à la fois organes lumineux et producteurs du mucus qui, mêlé à des fibres de soie produite par les glandes labiales, forment leurs « lignes de pêche »³. Les tubes de Malpighi fabriquent la soie chez des Coléoptères et des Neuroptères, ainsi que, vraisemblablement chez des Éphéméroptères et des Thysanoptères ; issu de l'anus, le fil est souvent mis en place à l'aide des pièces buccales.

Les **glandes cuticulaires** sont des formations originales, probablement dérivées d'organes des sens, situées sur les tarsi des pattes antérieures des Embioptères et de Diptères, et sur l'abdomen d'Hyménoptères. Les **glandes collété-riques**, internes mais également d'origine ectodermique, sont des annexes de l'appareil génital fe-



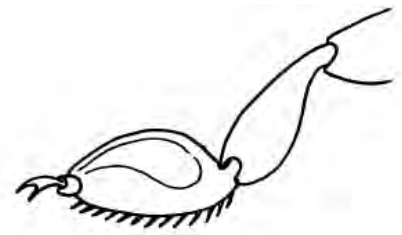
Femelle d'*Antipaluria urichi* (Embioptère, Clothodidé) en train de tisser sa toile et gardant ses œufs dont on distingue les opercules circulaires à sa droite et en avant. Elle mesure environ 1,7 cm (Trinidad of the West Indie). – Cliché Janice Edgerly-Rooks à <http://www.scu.edu/cas/biology/staffandfaculty/janiceedgerly-rooks.cfm>

melle qui produisent la soie chez des Coléoptères ; au nombre d'une ou deux paires, elles débouchent vers la base de l'oviducte. Leur rôle le plus fréquent est de sécréter un matériau de protection de la ponte (comme les oothèques des blattes et des mantes).

■ LES INSECTES SÉRICIGÈNES

Les principaux Hexapodes qui ne produisent pas de soie sont les collembolés, les protozoaires, les perles, les forficules, les phasmes, les poux, les blattes, les mantes⁴ et les termites.

La faculté de synthétiser ce matériau est apparue plusieurs fois au cours de l'évolution ; beaucoup de cas sont isolés. Les principaux ordres qui ont tous leurs représentants capables (peu ou prou) de filer la soie sont les Embioptères, les Lépidoptères et les Trichoptères (ordres proches). Les Hyménoptères, les Siphonoptères, les Neuroptères, les Thysanoptères, les Psocoptères



Extrémité de la patte antérieure d'un Embioptères. Sur le basitarse (1^{er} article) renflé, des soies creuses sont le débouché des glandes séricigènes.

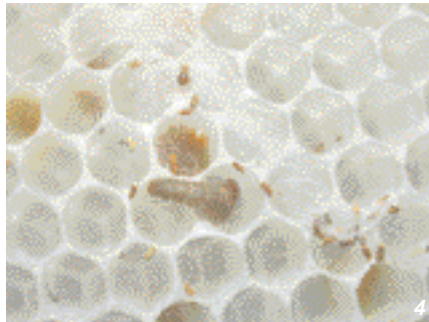
et les Thysanoures ont divers représentants également capables de filer la soie. Sans compter les cas épars, relevés dans d'autres grands groupes où certaines familles, voire certains genres, filent : Diptères, Coléoptères et Orthoptères, ni les exceptions, cas isolés d'espèces productrices de soie dans des groupes qui ne le sont pas.

Les **Embioptères** (ou *Embiidina*) forment un ordre homogène de petits insectes orthoptéroïdes, hétérométaboles. Larves (4 stades) et adultes (mâle ailé, femelle aptère en général) ont le même mode de vie colonial particulier⁵ : les individus passent la journée dans un réseau de tunnels, où ils circulent aussi bien en avant qu'à reculons, sortant la nuit pour s'alimenter (aux dépens

3. À (re)lire « Les vers luisants de la Nouvelle-Zélande », par Pierre Jolivet. *Insectes* n° 138, 2005(3), en ligne à www.inra.fr/opie-insectes/pdf/i138jolivet.pdf

4. Pour quelques auteurs, les oothèques des blattes et des mantes (anciens Dictyoptères), constituées en partie de protéines fibreuses, sont faites d'une « sorte de soie ».

5. Les femelles s'occupent de leurs œufs, ainsi que de leurs larves chez certaines espèces. Cf « Prendre soin des jeunes », par Alain Fraival. *Insectes* n° 152, 2009(1), en ligne à www.inra.fr/opie-insectes/pdf/i152fraival1.pdf



1. La Luffie des murailles, *Luffia lapidella* - Cliché H. Guyot. 2. Pyrale de la farine - Cliché H. Guyot.
3. Mite tapissière - Cliché G. Gerding, Creative Commons 3.0. 4. Pyrale des nids de bourdons (*Aphomia sociella*) - Cliché H. Guyot

de végétaux). Les tunnels ont une armature en soie ; leurs parois incorporent des débris, des crottes... Les larves nouveau-nées, séparés de leur mère, se mettent à tisser un tunnel à leur taille. Affairés à la construction ou à la réparation, les embies « tricotent », croisant et décroisant très rapidement leurs pattes avant. Les glandes séricigènes sont en effet situées à leur extrémité, sur le basitarse élargi : au nombre de plusieurs centaines, situées sous l'épiderme, elles sont constituées d'une unique cellule plurinucléée dont la lumière est prolongée par un canalicule cheminant jusqu'à l'extrémité d'une soie. L'ensemble pourrait être dérivé d'une sensille. Ces glandes produisent un fil fin et très solide.

Les **Lépidoptères** sont les plus connus des producteurs de soie ; elle est filée par les chenilles (glandes labiales) surtout pour construire ou aménager des abris (cocon, fourreau, toile, nid...) mais elle a d'autres usages... Certains produisent de la soie en abondance tout au long de leur vie larvaire, d'autres ne

font qu'un coussinet pour accrocher la chrysalide. On ne donnera ici que quelques exemples (voir l'encadré sur les chenilles séricigènes exploitées).

Les chenilles « à sac » des Psychidés⁶ construisent un fourreau (fait en soie et matériaux divers incorporés au réseau de fils) qu'elles transportent ; il abritera aussi la nymphe puis l'adulte femelle, qui est larviforme ; certaines (les luffies) ancrent un fil de soie sur lequel elles tirent pour se déplacer et qui leur sert d'aérophore, leur permettant de se disperser au gré du vent. D'une famille voisine (Tinéidés), la Mite tapissière, *Tineola bisselliella*, confectionne des tunnels et des pistes de soie, où ses excréments s'agglutinent en grappes, à mesure qu'elle ronge le tissu ; à l'approche de la nymphose, elle file un cocon en soie.

Les galeries de la Fausse Teigne des ruches, *Galleria melonella* (Pyralidé) sont bien connues de tous les apiculteurs : elles traversent les rayons, étouffant le couvain et salissant les cadres. Ces tunnels, indispensables pour protéger les

chenilles des piqûres de son hôte, sont élastiques : la larve peut s'y retourner. Ils retiennent les grains de pollen (que la chenille consomme) ainsi que ses fèces. La même soie, polyvalente, sert à confectionner un solide cocon. Les chenilles des Pyralidés ont des mœurs très variées mais la plupart vivent dans des tunnels ou des amas de soie, ou relient des feuilles entre elles par des fils de soie. Parmi les chenilles des denrées, dont les dégâts consistent surtout en souillures, celles de la Pyrale de la farine (*Ephestia kuehniella*) circulent en tissant un réseau de soie qui agglomère les grains du substrat avec leurs crottes et leurs exuvies ; il en résulte des amas capables de colmater les cribles et de bloquer les machines.

L'arpeuteuse *Synchlora frondaria* (Géométridé) se camoufle sous des fragments de pétales ou de feuilles, qu'elle fixe avec un fil de soie à ses soies⁷ dorsales : en plus, elle adapte sa couleur au substrat. Autre bri-

Fil fatal

La Teigne du poireau, *Acrolepiopsis assectella* (Plutellidé), est souvent victime d'un parasitoïde qui l'attaque au stade nymphal. Le cocon semble attractif pour les femelles de *Diadromus pulchellus* (Hym. Ichneumonidé). En fait – on l'a montré en observant son comportement – ce sont les fils de soie laissés sur la plante par la chenille qui orientent la femelle : si elle rencontre un tel fil, elle le suit... jusqu'à son hôte. À son contact, quatre glycoprotéines du cocon agissent comme signal d'acceptation.



Cocon de la Teigne du poireau
Cliché R. Coutin - OPIE

6. À (re)lire « Les fourreaux des psychés », par Vincent Albouy – ill. Jean-Louis Verdier. *Insectes* n° 135 (2004-4), en ligne à www.inra.fr/opie-insectes/pdf/i135albouy-verdier.pdf
7. Voir note 1.

Le Bombyx du mûrier, ses substituts et ses concurrents

La soie de *Bombyx mori* est exploitée depuis des millénaires en Extrême-Orient. L'insecte est parfaitement domestiqué, son élevage – menacé par des maladies – est bien au point et donne lieu à la seule sériciculture industrielle.

Avant son introduction (en fraude et par deux moines en mission) en Europe, vers 552, on produisait la soie à partir du cocon de la Chouette *Pachypasa otus* (nommée *bombyx* par Pline), la chenille étant élevée sur lentisque ; cet artisanat a subsisté en Italie jusque vers 1875. Les autres Lépidoptères séricigènes dont on a tenté ou réussi l'exploitation sont des Saturniidés, grands papillons subtropicaux.

Une trentaine d'espèces fournissent de la soie ; on récolte les cocons en nature ou on les élève (espèces semi domestiques). Parmi celles-ci, le Bombyx* de l'ailante *Philosamia cynthia*, asiatique, est naturalisé en Europe depuis 1861. Citons également le Bombyx chinois (soie tussah) *Antheraea pernyi*, le Polyphème d'Amérique (*A. polyphemus*) et la Saturnie du chêne du Japon (ou Bombyx yama-mai), *A. yamamai*.

En Inde, on fait des filets de pêche de la soie du « goree », *Theophila religiosae*. *Rothschildia aurota* est le seul ver à soie d'Amérique du Sud.

* Le nom de bombyx prête à confusion, qui fut à l'origine d'une catastrophe : voir « Les bons bombyx et les non bombyx », par Alain Fraval (rubrique Parlez-vous entomo ?), *Insectes* n° 145 (2007-2), en ligne à www.inra.fr/opie-insectes/pdf/1145fraval4.pdf et « Étienne-Léopold Trouvelot ou l'amateurisme catastrophique », par A.F., *Insectes* n° 145 (2007-2), en ligne à www.inra.fr/opie-insectes/pdf/1145fraval5.pdf



1. et 2. Couple de Chouettes et chenille tissant son cocon - 3. Cocon du Bombyx de l'ailante. On distingue le réseau de fils de soie dont la chenille entoure le pétiole et le rameau portant la feuille, cette dernière restant ainsi fixée à la plante à l'automne - 4. Détail du réseau soyeux entourant le pétiole de la feuille - 5. Bombyx chinois sur son cocon - 6. Polyphème d'Amérique - 7. et 8. Cocon de la Saturnie du chêne du Japon et mâle adulte - 9. *Rothschildia aurota* sur son cocon.

Clichés H. Guyot sauf 2 et 3 : clichés Cl. Villemant (jardin du laboratoire d'entomologie du MNHN).



« Appareil sonore » mexicain constitué de cocons vides d'*Attacus*. Collection du Muséum national d'histoire naturelle - Cliché Agnèle Touret-Alby



Cocons d'*Anaphe* sp. (Lép. Notodontidés), récoltés au Congo (1906). Collection du Muséum national d'histoire naturelle - Cliché Agnèle Touret-Alby

coleuse, la chenille très poilue de l'écaïlle brésilienne *Clystea (Aethria) carnicauda* (Arctiidé) choisit une tige dressée pour se nymphoser puis procède à quelques préparatifs destinés à garantir sa tranquillité :



Chenille de la Recluse (*Clostera pigra*, Notodontidé) - Cliché A. Borges

elle s'arrache des soies du dos (piquantes) avec ses mandibules puis les attache au support avec un fil de soie, de façon à constituer un collier anti-escalade. Elle répète l'opération 3 ou 4 fois puis se hisse et installe des colliers au-dessus d'elle. Les soies qui lui restent garniront le cocon, en guise d'armure.

Les chenilles des Gracillariidés vivent en général en mineuses puis en ectophytes qui se fabriquent un

fourreau en enroulant une feuille en cigare, maintenue par un lien de soie. C'est le cas de *Caloptilia leucapennella* du chêne-liège. Sur le même arbre, de la même famille, *Phyllonorycter messaniella* reste mineuse jusqu'à la nymphose ; à la fin de son développement, elle tisse un réseau de soie entre les deux parenchymes qui fait gonfler la mine élargie, formant une sorte de tente. Sur ce même arbre, le comportement des chenilles du Bombyx disparate (*Lymantria dispar*, Lymantriidé) a été bien observé⁸. Les chenilles tissent, surtout dans des conditions défavorables, un fil qui accompagne leurs déplacements : marche, chute et... vol. La chenille nouveau-née (5 à 6 mm de long) peut produire un fil de 8 m de long, qu'elle dévide en cas de chute de l'extrémité d'un rameau ; elle peut y regrimper ou, s'il vente, se laisser emporter, « volant » grâce à lui et à ses soies ballonnées (record : 40 km). Les chenilles âgées font de même ; en cas de surpopulation, elles tombent ou descendent des arbres (alors défeuillés), regrimpent,

retombent... balisant leur parcours sur le tronc d'un fil. L'ensemble des fils finit parfois par constituer un épais manchon.

On connaît quelque 300 espèces de chenilles grégaires qui tissent des toiles ou des nids collectifs. Des exemples familiers sont fournis par les hyponomeutes (Yponomeutidés) et les processionnaires (Notodontidés). Après avoir hiverné en diapause dans l'ooplaque, les chenilles de l'Hyponomeute du pommier (*Yponomeuta malinellus*) minent les feuilles ; au 2^e stade larvaire, elles entrent dans leur phase « fileuse-brouteuse », dévorant tout à l'abri d'une toile de soie collective – ceci jusqu'à leur nymphose qui se passera à l'intérieur de cette construction ; la toile est remaniée, une partie de la soie est consommée et recyclée. Dès le premier stade, les chenilles de la processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*) tissent un abri communautaire en soie où elles stationnent le jour, sortant la nuit en procession pour aller brouter les aiguilles ; à l'approche de l'hiver, les chenilles âgées confectionnent un gros nid collectif à double paroi de soie, qui fonctionne comme un radiateur. Leur nymphose a lieu dans le sol, à l'issue d'une procession bien connue⁹. ■

...à suivre.

8. Un dossier complet est en ligne à www.inra.fr/opie-insectes/ld.htm

9. « Les processionnaires – 1^{ère} partie », par Alain Fraval. *Insectes* n° 147 (2007-4), en ligne à www.inra.fr/opie-insectes/pdf/i147fraval3.pdf